

## ЗАХВАТ И РЕЛАКСАЦИЯ ЗАРЯДА НА ДЕФЕКТАХ СТРУКТУРЫ В ЭПИТАКСИАЛЬНОМ GaAs

© И.В.Островский, С.В.Сайко

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко  
252022 Киев, Украина

(Получена 3 февраля 1995 г. Принята к печати 12 октября 1995 г.)

С помощью методов переходного поперечного акустоэлектрического напряжения и переходной емкости на границе раздела в эпитаксиальных структурах  $n$ -GaAs/ $i$ -GaAs обнаружены глубокие ловушечные уровни с энергиями активации 0.54 и 0.48 эВ. Методом переходного поперечного акустоэлектрического напряжения определены времена релаксации и эффективные сечения захвата электронов для этих центров.

Проведено сравнение двух методик — непрерывный и импульсный режим измерения поперечного акустоэлектрического напряжения. Обе методики в пределах погрешности измерений дают одинаковые значения времени релаксации. Непрерывный режим измерений более удобен для определения малых времен релаксации (<1 мс); импульсный режим предпочтителен для определения больших времен релаксации (>1 мс).

### Введение

Активное исследование слоистых структур на основе арсенида галлия вызвано их широким применением в микроэлектронной полупроводниковой технике. Свойства слоистых структур в большой степени определяются границами раздела, которые являются аккумуляторами различных точечных дефектов. Для их изучения развито большое количество экспериментальных методов, таких как DLTS [1], измерения вольт-фарадных характеристик [2], метод акустоэлектрического напряжения [3]. Существуют также попытки теоретического расчета параметров точечных дефектов, которые, однако, сталкиваются с большими математическими трудностями [4,5].

Экспериментально в арсениде галлия и эпитаксиальных структурах на его основе обнаружено много различных дефектов, которые образуют глубокие уровни [6,7]. В пионерских экспериментальных работах были определены энергетические положения этих уровней в запрещенной зоне полупроводника. В настоящее время основная часть работ направлена на определение атомной структуры этих дефектов [8,9].

Цель данной работы — определение параметров основных дефектов, которые присутствуют на границах раздела в эпитаксиальных структурах подложка  $i$ -GaAs — эпитаксиальный слой  $n$ -GaAs, таких как эффективные сечения захвата и времена релаксации заряда, захваченного этими центрами. В качестве экспериментальной методики использовался метод нестационарного поперечного акустоэлектрического напряжения (ПАН), который позволяет непосредственно определять времена релаксации заряда ( $\tau$ ) и рассчитывать эффективные сечения захвата заряда ( $S$ ) для различных ловушечных уровней [10,11]

## 2. Методика определения $\tau$ и $S$

Экспериментальная установка и размещение образцов для получения ПАН была общепринятой, это подробно описано в экспериментальных работах [10–12]. В качестве звукопровода использовалась пластинка ниобата лития, в которой возбуждались поперечные нормальные акустические волны на частоте 5.8 МГц. Для объяснения полученных результатов необходимо учесть, что ПАН складывается из концентрационной и ловушечной компонент. Обычно ловушечный ПАН связан с накапливающимся на поверхностных состояниях зарядом. Последний может быть представлен в виде суммы концентраций зарядов  $n_{ti}$  на отдельных уровнях [13]. Феноменологическое уравнение для изменения концентрации избыточного заряда, захваченного на поверхностные ловушки  $i$ -го типа, во времени  $t$  имеет вид

$$dn_{ti}/dt = -n_{ti}/\tau_i + F_i(t), \quad (1)$$

где  $\tau_i$  — время релаксации избыточного заряда,  $F_i(t)$  — внешняя сила, которая инициирует захват избыточного заряда на поверхностные ловушки, усредненная по периоду акустической волны (физическая природа этой силы связана с пьезоэлектрическим полем ультразвука и акустоэлектрическим эффектом) [12].

При измерении времени релаксации в импульсном режиме  $F(t)$  имеет вид

$$F(t) = \begin{cases} \text{const}, & 0 < t < T; \\ 0, & t > T. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $T$  — длительность возбуждающего импульса (рис. 1,а).

Измерение формы сигнала ПАН производилось после выключения возбуждающего импульса (участок  $BC$  на рис. 1,а,  $F(t) = 0$ ). В этом случае решение уравнения (1) есть экспонента с временем релаксации  $\tau_i$ . Тогда, если в образце существует несколько типов ловушек, то спадающий участок акустоэдс можно представить в виде суммы экспоненциальных составляющих,

$$V_{ae} = \sum_i V_{0i} \exp(-t/\tau_i). \quad (3)$$

Теперь рассмотрим случай модуляции возбуждающего высокочастотного напряжения низкочастотным синусоидальным сигналом  $V_{us}$  на частоте  $\Omega$  (рис. 1,б):

$$V_{us}(t) = V_0[1 + m \exp(i\Omega t)] + \text{c.c.} \quad (4)$$

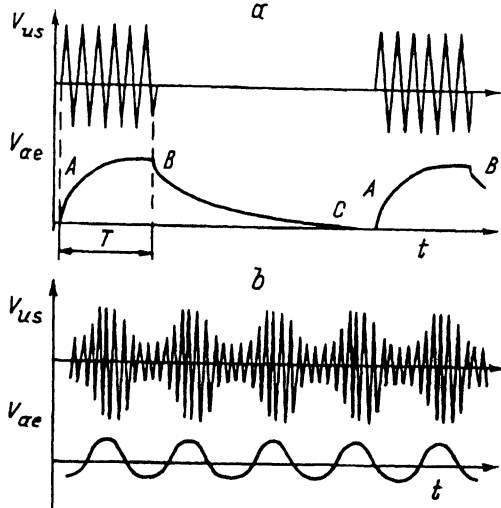


Рис. 1. Форма высокочастотного возбуждающего сигнала ( $V_{us}$ ) и сигнала ПАН ( $V_{ae}$ ) для импульсного (а) и непрерывного (б) режимов измерения.

Согласно [12], амплитуда ловушечной составляющей сигнала ПАН прямо пропорциональна  $V_{us}(t)$ . Следовательно, в этом случае  $F(t)$  можно записать в виде

$$F_i(t) = B_i V_0 [1 + m \exp(i\Omega t)] + \text{с.с.}, \quad (5)$$

где  $B_i$  — коэффициент пропорциональности.

Решение уравнения (1) с учетом (5) при  $t \gg \tau_i$  (установившийся режим) имеет вид

$$n_{ti} = V_0 B_i \tau_i + \frac{V_0 B_i \tau_i m}{1 + i\Omega \tau_i} \exp(i\Omega t) + \text{с.с.} \quad (6)$$

Если на поверхности образца существуют несколько типов ловушечных уровней, то составляющая акустоэлектрического сигнала на частоте модуляции  $\Omega$  вместе с не зависящей от  $\Omega$  концентрационной компонентой  $V_k$  может быть записана в виде

$$V_{ae}(\Omega) = \left( V_k + \sum_j \frac{V_{0j}}{1 + i\Omega \tau_j} \right) \exp(i\Omega t) + \text{с.с.}, \quad (7)$$

где  $V_{0j}$  зависят от величины возбуждающего сигнала и коэффициента модуляции  $m$  и не зависят от частоты модуляции  $\Omega$ .

Чтобы воспользоваться выражением (7) для интерполяции экспериментальных данных, необходимо в явном виде записать комплексно сопряженную часть и произвести сложение. Несложные преобразования дают следующий результат:

$$|V_{ae}(\Omega)| = \sqrt{[V_1(\Omega)]^2 + [V_2(\Omega)]^2}, \quad (8)$$

$$V_1(\Omega) = \sum_j \frac{V_{0j}}{\sqrt{1 + (\Omega\tau_j)^2}} \cos[\arctg(\Omega\tau_j)],$$

$$V_2(\Omega) = \sum_j \frac{V_{0j}}{\sqrt{1 + (\Omega\tau_j)^2}} \sin[\arctg(\Omega\tau_j)].$$
(9)

Формулы (3) и (8), (9) учитывают также и концентрационные компоненты сигнала акустоэдс, для которых формально необходимо положить  $\tau = 0$ . Используя выражения (3) или (8), (9) для интерполяции экспериментальных данных, можно определить количество ловушек различного типа на поверхности образца, а также времена релаксации  $\tau_i$  захваченного на эти ловушки заряда. В том случае, когда уровень Ферми на поверхности полупроводника  $F_s$  лежит значительно ниже энергетического уровня ловушки  $E_{ti}$  ( $E_{ti} - F_s \ll kT$ ), связь между эффективным сечением захвата заряда на ловушку  $S_i$  и параметрами  $\tau_i$  и  $E_{ti}$  определяется хорошо известным выражением

$$S_i = \frac{1}{N_c \tau_i V_T} \exp(E_{ti}/kT),$$
(10)

где  $N_c$  — плотность электронных состояний у дна зоны проводимости,  $V_T$  — тепловая скорость электронов. Таким образом, определив непосредственно из экспериментальных результатов время релаксации  $\tau_i$  и глубину залегания  $E_{ti}$  для отдельного типа ловушек, можно рассчитать сечение захвата заряда на ловушки этого типа.

В качестве исследуемых образцов в экспериментах использовался арсенид галлия с эпитаксиальным слоем. На подложке  $i$ -GaAs находился тонкий слой  $n$ -GaAs, выращенный методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОС-гидридная технология) (образцы К-16). Образцы размещались эпитаксиальным слоем на звукопроводе. При такой конфигурации основной вклад в сигнал поперечной акустоэдс дают ловушки на границе раздела эпитаксиального слоя и подложки [14]. Определение времен релаксации  $\tau_i$  производилось путем интерполяции экспериментальных данных по формулам (3) (импульсный режим) и (8), (9) (непрерывный режим) с помощью специальных программ, минимизирующих ошибки.

Кроме того исследовался интегральный образец Ga-Al. Этот образец также состоял из подложки  $i$ -GaAs и выращенного на ней по МОС-гидридной технологии эпитаксиального слоя  $n$ -GaAs. На эпитаксиальном слое фотолиграфическим методом был сформирован встречно-штыревой преобразователь (ВШП) для возбуждения поверхностных акустических волн непосредственно в образце, а также алюминиевый электрод. Алюминиевый электрод создавал контакт Шоттки на эпитаксиальном слое [14], что позволило использовать этот образец для измерений «переходной» емкости типа измеряемой в методе DLTS [15], модулируемой импульсами напряжения прямоугольной формы, приложенными к электроду. Для исследования ПАН акустические поверхностные волны возбуждались с помощью ВШП непосредственно в образце [10,11,16].

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 показан спадающий участок сигнала ПАН после выключения возбуждающего импульса для образцов К-16 (точки — эксперимент, линия — расчет по формуле (3)). Расчеты показали, что спадающий участок хорошо описывается суммой двух экспонент с временами релаксации  $\tau_1 = 2$  мс и  $\tau_2 = 12$  мс. На рис. 3 показана зависимость амплитуды сигнала ПАН, измеренного в непрерывном режиме, от частоты модуляции  $f$  высокочастотного сигнала синусоидальным напряжением ( $f = \Omega/2\pi$ ). Аппроксимация этой кривой расчетом по формулам (8), (9) также дала времена релаксации  $\tau_1 = 2$  мс  $\tau_2 = 12$  мс (рис. 3). Необходимо отметить, что использование выражений (8), (9) для непрерывного режима существенно сложнее в расчетах, чем выражение (3) для импульсного режима. Особенно это относится к случаю больших времен релаксации ( $\tau > 10$  мс), поскольку в этом случае наблюдается быстрое уменьшение сигнала ПАН уже на частотах модуляции  $20 \div 30$  Гц, и решение задачи становится неустойчивым. Непрерывный режим удобнее использовать для определения времени релаксации более быстрых ловушек ( $\tau < 1$  мс), а особенно для выделения концентрационной составляющей сигнала ПАН. Действительно, при больших частотах модуляции, как следует из выражений (8), (9), вклад ловушечных составляющих в ПАН стремится к нулю, тогда как вклад концентрационной составляющей остается постоянным. В нашем случае амплитуда сигнала ПАН при увеличении  $\Omega$  стремилась к нулю (рис. 3) — следовательно, для образцов К-16 концентрационной составляющей ПАН можно пренебречь.

Импульсный режим измерения релаксации ПАН, наоборот, удобнее использовать при больших временах релаксации ( $\tau > 1$  мс) и сложнее при малых ( $\tau < 0.5$  мс). В частности, для импульсного режима нижняя граница измерения времени релаксации определяется временем выхода акустической волны из-под образца. Таким образом, обе методики

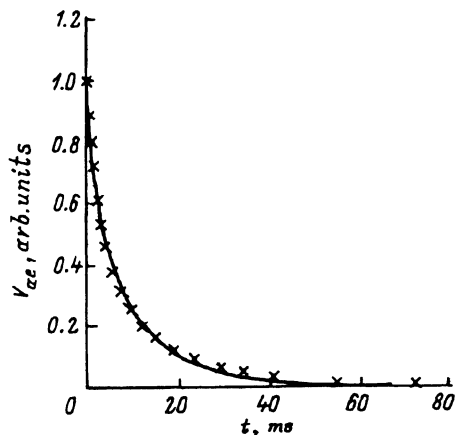


Рис. 2. Форма участка спада сигнала ПАН в импульсном режиме измерений. Точки — эксперимент, линия — интерполяция по формуле (3) двумя экспонентами с временами релаксации 2 и 12 мс. Образец К-16.

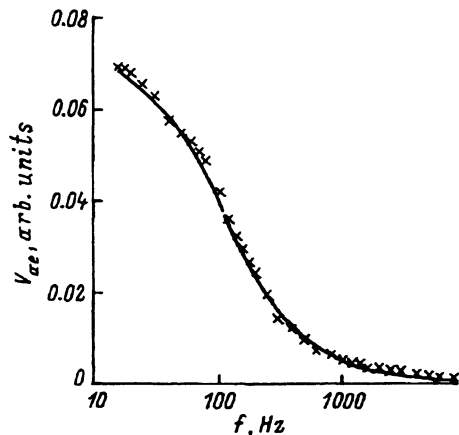


Рис. 3. Зависимость величины ПАН от частоты модуляции возбуждающего сигнала в непрерывном режиме измерений. Точки — эксперимент, линия — расчет по формулам (8), (9) с двумя временами релаксации 2 и 12 мс. Образец К-16.

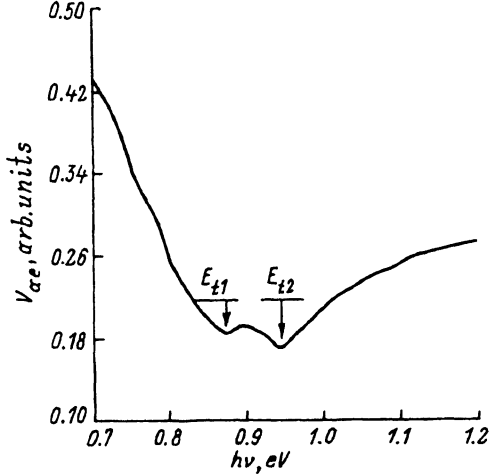


Рис. 4. Спектр ПАН, снятый в момент времени спустя 4 мс после выключения возбуждающего импульса. Образец К-16.

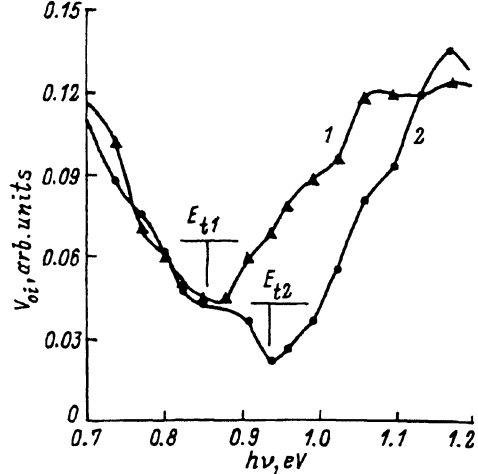


Рис. 5. Спектры амплитуд составляющих сигнала ПАН  $V_{0i}$  с различными временами релаксации  $\tau_i$ , мс: 1 — 2, 2 — 12. Образец К-16.

(импульсного и непрерывного режимов измерений) взаимно дополняют друг друга и позволяют определять времена релаксации ПАН в довольно широком диапазоне значений ( $0 \div 100$  мс).

Поскольку в наших образцах на границе раздела эпитаксиальный слой-подложка преобладали ловушки с временами релаксации 2 и 12 мс, для дальнейшего определения параметров этих уровней и анализа использовался импульсный режим.

Для определения энергетического положения ловушечных уровней в запрещенной зоне полупроводника исследовались спектры подсветки при регистрации ПАН. На рис. 4 показан такой спектр, снятый в момент времени  $t = 4$  мс после выключения возбуждающего ультразвуков сигнала. Как и предполагалось, отчетливо наблюдаются два минимума при энергиях фотонов подсветки  $h\nu_1 = 0.88$  эВ и  $h\nu_2 = 0.94$  эВ, что соответствует двум типам ловушечных уровней. Для того чтобы определить, каким именно временам релаксации соответствуют эти уровни, необходимо было построить спектры для отдельных составляющих сигнала ПАН. Оказалось, что на свету времена релаксации  $\tau_1$  и  $\tau_2$  уменьшались по сравнению со значениями в темноте. Это объясняется тем, что при освещении образца повышается энергетическое положение квазиуровня Ферми, что ведет к уменьшению времени релаксации [17]. Однако на участке спада сигнала ПАН при этом продолжают оставаться две составляющие с различными временами релаксации. На рис. 5 показаны спектры амплитуд этих составляющих. Оказалось, что ловушка с временем релаксации в темноте 2 мс имеет глубину залегания  $E_{t1} = 0.54$  эВ ( $E_{ti} = E_g - h\nu_i$ , где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны), а ловушка с временем релаксации 12 мс — глубину залегания  $E_{t2} = 0.48$  эВ.

Для образца Ga-Al в измерениях по аналогичной методике также наблюдался глубокий уровень с энергией залегания  $E_{t2} = 0.48$  эВ [16]. На рис. 6 показана спектральная зависимость переходной емкости  $\Delta C$ , а также ее производная по энергии фотонов для Ga-Al. Кривая имеет

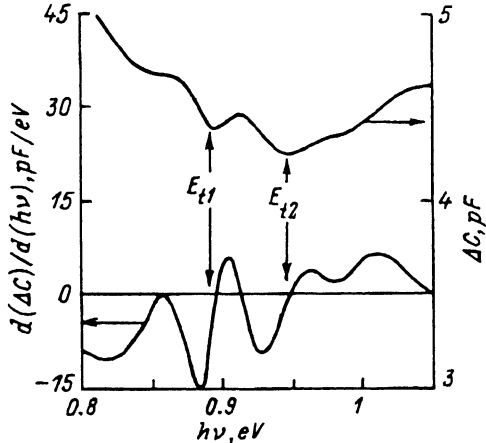


Рис. 6. Спектр переходной емкости  $\Delta C$  и ее производной по энергии фотонов  $d\Delta C/dh\nu$ . Образец Ga-Al.

несколько минимумов и точек перегиба, что соответствует энергетическому положению различных типов центров захвата заряда в запрещенной зоне полупроводника. Как и следовало ожидать, наиболее яркие минимумы соответствуют по своему энергетическому положению уровням с энергией активации 0.54 и 0.48 эВ.

Зная характерные времена релаксации избыточного заряда  $\tau_i$  и энергии залегания поверхностных центров  $E_{ti}$ , можно определить эффективные сечения захвата  $S_i$  для этих уровней. Используя в расчетах выражение (10), для глубоких уровней  $E_{t1}$  и  $E_{t2}$  мы нашли эффективные сечения захвата, они равны  $S_1 = 2.5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$  и  $S_2 = 3.6 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  соответственно.

#### 4. Заключение

1. По методике измерения релаксации ПАН в импульсном режиме определены времена релаксации и эффективные сечения захвата электронов для глубоких центров с оптическими энергиями залегания  $E_{t1} = 0.54 \text{ эВ}$  и  $E_{t2} = 0.48 \text{ эВ}$  в эпитаксиальных структурах  $n\text{-GaAs}/i\text{-GaAs}$ , а именно —  $\tau_1 = 2 \text{ мс}$ ,  $S_1 = 2.5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ ,  $\tau_2 = 12 \text{ мс}$ ,  $S_2 = 3.6 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ .

2. Из сравнения двух методик определения времени релаксации заряда на центрах захвата (т.е. непрерывный и импульсный режимы измерения ПАН) следует, что обе методики в пределах погрешности измерений дают одинаковые значения. Однако метод ПАН в импульсном режиме более предпочтителен с точки зрения математической обработки результатов. Непрерывный режим измерений более удобен для определения малых времен релаксации ( $\tau < 1 \text{ мс}$ ), тогда как импульсный режим предпочтителен в случае больших времен релаксации ( $\tau > 1 \text{ мс}$ ).

Исследования, представленные в этой публикации, выполнены при поддержке Международной соросовской программы образования в области точных наук, Фонд «Відродженне» (грант № 042047).

- [1] A. Chantre, G. Vinsent, D. Bios. Phys. Rev. B, **23**, 5335 (1981).
- [2] A. Cola, M.G. Lupo, L. Vasanelli, A. Valentini. Sol. St. Electron, **36**, 785 (1993).
- [3] H. Gilboa, P. Das. Surf. Sci., **62**, 536 (1977).
- [4] G.A. Baraff, M. Schlüter. Phys. Rev. Lett., **55**, 1327 (1985).
- [5] G.A. Baraff, M. Schlüter. Phys. Rev. B, **30**, 1893 (1984).
- [6] G.M. Martin, A. Mitonneau, A. Mircea. Electron. Lett., **13**, 191 (1977).
- [7] A. Jorio, C. Rejeb, M. Parenteau, C. Carlone, M. Khanna Shyam. J. Appl. Phys., **74**, 2310 (1993).
- [8] R.B. Beall, R.C. Newman, J.E. Whitehouse, J. Woodhead. J.Phys. C: Sol. St. Phys. **18**, 3273 (1985).
- [9] J. Weber, G.D. Watkins. J. Phys. C: Sol. St. Phys., **18**, L269 (1985).
- [10] A. Abbate, K.J. Han, I.V. Ostrovskii, P. Das. Sol. St. Elctron., **36**, 697 (1993).
- [11] И.В. Островский, С.В. Сайко, Р.К. Савкина. ФТП, **28**, 796 (1994).
- [12] Ю.В. Гуляев, А.М. Кмита, А.В. Медведь, В.П. Плесский, Н.Н. Шибанова, В.Н. Федорец. ФТТ, **17**, 3505 (1975).
- [13] А.В. Ржанов. *Электронные процессы на поверхности полупроводников* (М., Наука, 1971).
- [14] K.J. Han. *Electrical Characterization of Semiconductors Using Surface Acoustic Wave*, Ph. D. Thesis (Rensselear Polytechnic Institute, 1992).
- [15] H.J. von Bardeleben, D. Stievenard, D. Deresmes, A. Huber, I.C. Bourgoin. Phys. Rev., **34**, 7192 (1986).
- [16] И.В. Островский, С.В. Сайко. Поверхность, вып. 10-11, 62 (1994).
- [17] И.В. Островский, С.В. Сайко. ФТТ, **35**, 1043 (1993).

Редактор Л.В. Шаронова

## Trapping and relaxation of charge on the structural defects in epitaxial GaAs

*I.V. Ostrovskii, S.V. Saiko*

T. Shevchenko University of Kiev, 252022, Kiev, the Ukraine.